

működését egyértelműen eredményesnek és sikeresnek ítélik meg. Idővel a bizottság tekintélye megkopott és Teller érdeklődése is más irányokba fordult. A későbbiekben már nem foglalkozott hivatásszerűen reaktorbiztonsággal, de a téma élete végéig érdeklődésének egyik legfontosabb tárgya maradt. A már halála után megjelent, valószínűleg legutolsó dolgozatában éppen a biztonság érdekében azt javasolta, hogy a reaktorokat süllyesszék a földfelszín alá.²

² R. W. Moir, E. Teller: Thorium fueled underground power plant based on molten salt technology. *Nuclear Technology* 151 (2005) 334–340.

Teller Edének a reaktorbiztonság területén végzett tevékenysége munkásságának ritka ellentmondásmentes területei közé tartozott. Ezzel kapcsolatban jegyezték meg életművének első méltatói, hogy ebben „megelőzte korát.”³ Sajnos, a közelmúlt tragédiája azt mondatja velünk, hogy Teller ebbéli munkássága a mi időnket is megelőzte. Érdemes lenne a Telleréhez hasonló hozzáállást nemcsak a nukleáris technológiában, hanem más veszélyes üzemek működtetésében is megvalósítani.

³ H. Brown, M. May: Edward Teller in the Public Arena. *Physics Today* (August 2004) 51–53.

HÍREK – ESEMÉNYEK

FIZIKAI NOBEL-DÍJ 2010

Tapasztó Levente
MTA MFA

2010. október 5-én Stockholmban bejelentették, hogy a fizikai Nobel-díj idei nyertesei, fele-fele arányban megosztva, *Andre Geim* és *Konstantin Novoselov*, orosz származású fizikusok (mindketten Manchesteri Egyetem), a grafénkutatás elindítói. Az indoklás szerint az első kétdimenziós kristály izolálásáért, azonosításáért és újszerű elektromos tulajdonságainak tanulmányozásáért érdemelték ki a legmagasabb tudományos elismerést.

Geim és Novoselov közös munkássága a Nijmegeni Egyetemen indult, ahol Novoselov Geim egyik PhD hallgatója volt. Érdekes módon tudományos munkásságuk ebben az időben erősen szerteágazó volt, a szupravezetéstől a biomimetikus anyagokon át a levitációig. (Ez utóbbival kapcsolatban Geim 2000-ben Ig Nobel-díjban részesült, egy élő béka mágneses lebegtetéséért.) A közös munka olyan gyümölcsözőnek bizonyult, hogy 2001-ben közösen mentek át a Manchesteri Egyetemre, ahol a gekkóktól lopott ötlet alapján kifejlesztett biomimetikus ragasztószalagok után végül a grafén felfedezése is megtörtént, szintén egy ragasztószalag segítségével.

Ha pusztán csak definiálni szeretnénk a grafén fogalmát, akkor igen könnyű dolgunk van, ugyanis a grafén nem más, mint az évszázadok óta ismert grafit kristály egyetlen atomsíkja. Elméleti munkákban már több mint hatvan éve alkalmazzák a grafén fogalmát, ez szolgált kiindulópontként a grafit sávszerkezetének számításához. Egyáltalán nem volt azonban világos, hogy önálló atomsíkként is létezhet. Épp ellenkezőleg, bizonyos elméleti megfontolások ezt a lehetőséget el is vetették, olyan alapon, hogy a kétdimenziós kristályok instabilak a termikus fluktuációkkal szemben. 2004-ben a most kitüntetett tudósok mégis siker-

esen izoláltak egyetlen atomi réteg vastag grafitcsíkokat, azaz a grafént. Talán még meglepőbb, hogy az előállítás nem a modern anyagtudomány valamelyik korszerű, „state of the art” nagyberendezésével, hanem egy megdöbbentően egyszerű, akár otthon is elvégezhető kísérlet segítségével történt. Természetes grafitkristály felületéről egy ragasztószalag segítségével leválasztottak néhány makroszkopikus grafit pikkelyt, amelyeket a ragasztószalag ismételt összeállításával és szétválasztásával addig vékonyítottak, amíg átlátszóvá váltak a pikkelyek a szalagon. Ezután a szalagot egy szilíciumkristály felületéhez érintették, majd leválasztották. Ekkor a szilíciumkristályon – a számos, optikai mikroszkóp alatt könnyen észlelhető, sokrétegű grafit pikkely mellett – néhány, csak speciális körülmények között megfigyelhető monoréteg is jelen volt. Ma már azt is tudjuk, hogy nagy valószínűséggel mindannyian állítottunk már elő grafént, miközben ceruzánkkal írtunk. Azonban a papíron hagyott ceruzanyomban gyakorlatilag lehetetlen azonosítani az egyrétegű grafénlemezeket. Ebből is jól látható, hogy a grafén felfedezésének legfőbb akadályát nem magának az anyagnak az előállítása, hanem ezen egyedülálló atomsíkok azonosítása jelentette. A most díjazott tudósok ezt a problémát egy igazán frappáns ötlettel hidalták át. Úgy gondolkodtak, hogy az egyre vékonyabb grafitpikkelyek egyre átlátszóbbak lesznek, így egy bizonyos rétegszám alatt már nem képesek annyi fényt elnyelni, hogy megfelelő kontrasztot adjanak az optikai mikroszkópban való észlelésükhöz. Felismerték viszont, hogy akár egyetlen réteg is képes lehet arra, hogy a rajta áthaladó fény fázisát jelentősen eltolja. Ezért Novoselovék a szilíciumkristály felületén létrehoztak egy 280 nm vastag szilícium-dioxid réte-



Andre Geim és Konstantin Novoselov 2010. október 5-én, a Nobel-díj kihirdetésének napján a Manchesteri Egyetem kertjében. (Fotó: AP – Jon Super)

get, amely már önmagában is lilás interferenciaszín eredményez. Azokon a helyeken pedig, ahol grafénlemezek találhatók (tipikusan a néhány mikronos laterális méretben), a fázistolás következtében az interferenciaszín kissé megváltozik, azaz nem intenzitásbeli, hanem színbeli kontrasztot kapunk. Ezzel az ötlettel már egy közönséges optikai mikroszkópban is könnyen azonosíthatóvá váltak a csupán egyetlen atomréteg vastagságú grafénlemezcskék.

A tudományos társadalom fokozott érdeklődéssel fogadta a grafén felfedezését, mert ezzel első alkalommal vált hozzáférhetővé egy valódi kétdimenziós kristály a kísérletek számára. Felvetődött ugyanakkor a kérdés, hogy vajon mennyiben különböznek a grafén tulajdonságai a sokat vizsgált és régóta jól ismert grafitétól. A kérdésre a választ, kísérleti bizonyítékokkal alátámasztva szintén a grafén felfedezői adták meg. Azáltal, hogy a grafénsíkot izoláljuk a grafitkristálytól, egy teljesen újszerű elektronszerkezettel rendelkező anyagot kapunk. Tulajdonképpen ezzel kezdődött a grafén sikertörténete és a Nobel-díjjal elismert eredmények fizikájának igazi mélysége. Amint azt Andre Geim egy interjúban megfogalmazta, nem az első kétdimenziós kristály, a grafén előállítás az a tudományos teljesítmény, amely ezt a magas elismerést indokolja, hanem az ezáltal hozzáférhetővé vált újszerű tulajdonságok és jelenségek sokasága, amelyeket csak a grafénban figyelhetünk meg. Ezeknek az egyedi és újszerű tulajdonságoknak köszönhetően a grafén robbanásszerű érdeklődést váltott ki mind az alapvető fizikai jelenségeket vizsgáló alaptudományok, mind az alkalmazásorientált kutatók területén.

Rögtön a grafén felfedezését követő egyik első munkájukban Geim és Novoselov arra is rámutattak, hogy a grafén egyedi tulajdonságainak legfőbb forrása a különleges elektronszerkezet, amelyet leegyszerűsítve úgy képzelhetünk el, mint a Fermi-szinten csúcsaikban

érintkező hat pár kúpából, úgynevezett Dirac-kúpokból álló rendszert. Már ebből is érzékelhető, hogy klasszikus értelemben a grafén se nem fém, se nem félvezető, hanem a kettő közötti furcsa átmenet. Létezik ugyan egy olyan energiaérték, amelyen a szabad töltéshordozók sűrűsége nulla, ám ez mindössze egyetlen energiára (pontosan a Fermi-energiára) igaz. Ennek alapján a grafént leginkább egy zérus szélességű tiltott sávval rendelkező félvezetőnek tekinthetjük. Talán még érdekesebb, hogy – az összes eddig ismert fémes és félvezető anyagtól eltérően – a grafénban az elektronok (és lyukak) lineáris disperziós relációt mutatnak a Fermi-szint környezetében. Ez

azzal egyenértékű, hogy a grafén hatszöges rácsában mozgó elektronok sebessége nem függ az energiájuktól, vagyis, mintha a töltéshordozók nem rendelkeznének tömeggel, hasonlóan a fotonokhoz. Pusztán annyi a különbség, hogy a grafén töltéshordozóinak „határsebessége” a valódi fénysebességnél 300-szor kisebb. A kísérleti bizonyítékot a lineáris disperzióra (zérus tömegre) a grafénon végzett kvantum Hall-mérések szolgáltatták, amelyekben a jelenség úgy nyilvánul meg, hogy a Hall-platók nem a vezetőképesség-quantum egész számú többszöröseinél, hanem valamelyest eltolva, a fél-egész értéknél jelentkeznek. Külön érdekesség ezzel kapcsolatban, hogy mind a mai napig a grafén az egyetlen olyan anyag, amelyben a kvantum Hall-effektust szobahőmérsékleten is észlelni lehetett.

A grafén azonban nem pusztán a fizikusok egzotikus jelenségeiben bővelkedő játszótéren, de számos olyan anyagtudományi szempontból kimagasló tulajdonsággal rendelkezik, amely az alkalmazások szempontjából is különösen vonzó. Elektromos jellemzőit tekintve a grafén a legjobb vezetők közé tartozik, amelyben a töltéshordozók mobilitása meghaladja a $200\,000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ értéket. Ez több mint százszorosa a szilíciumban mért mobilitásnak, azaz grafénból sokkal gyorsabb és kisebb fogyasztású elektronikai eszközök készíthetők. Jelenleg 300 GHz-es graféntranzistor működését sikerült laboratóriumi körülmények között demonstrálni és abban is egyetértenek a kutatók, hogy néhány technikai jellegű akadály elhárítása után a graféntranzistorok a terahertzes tartományban képesek majd működni. A jövő elektronikus eszközeinek szemszögéből a grafénnek még egy óriási előnye van a szilíciumhoz viszonyítva, ez pedig a kiváló hővezető-képessége. A szilícium alapú elektronika nagy problémája, hogy az eszköz működése során keletkező hő egy bizonyos eszközméret alatt már nem lehet megfelelően elvezetni. Ehhez képest a grafén hőveze-

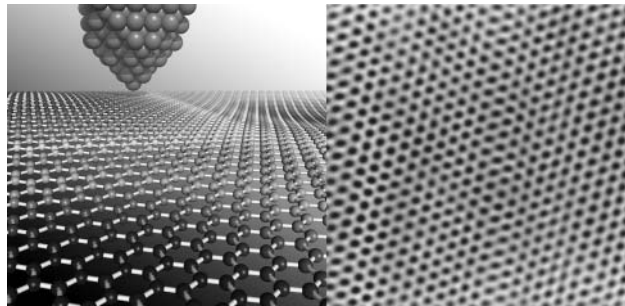
tő-képessége több mint tízszer jobb a réz hővezető képességénél. Továbbá a grafén kétdimenziós geometriája kompatibilis a napjainkban használt planáris félvezető technológiákkal. Ezek a tényezők együttesen indokolják, hogy a grafén már a kutatás igen korai szakaszában is igen komolyan felkeltette az elektronikai ipar érdeklődését: hosszabb távon azt várják, hogy a szilícium alternatívájává váljon.

Amikor sikerült elég nagyméretű grafénpikkelyeket előállítani, hogy megbízhatóan megmérhessék a grafén átlátszóságát, a most díjazott tudósok két érdekes jelenségre is felfigyeltek. Az első, hogy az intuíciónkkal ellentétben a pusztán egyetlen atomi réteg vastag grafénhártya a rá eső fénynek egy jelentős részét, pontosan 2,3%-át elnyeli. Ami viszont talán még meglepőbb, hogy az optikai abszorpció mértékét egy univerzális konstans határozza meg, mégpedig a kvantum-elektrodinamikából jól ismeri fónomszerkezeti állandó:

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \text{ és } \frac{\pi}{137} = 2,3\%.$$

A grafén optikai tulajdonságai azért különösen érdekesek, mert kitűnően vezető, átlátszó elektródaként alkalmazható fotovoltaiikus eszközökben, ahol hosszabb távon a kifogyófélben lévő ITO (indium tin oxide) alternatívája lehet.

Mindent összevetve, a 2010-es fizikai Nobel-díj több szempontból is rendhagyó. Először is az egyik díjazott, Kostya Novoselov mindössze 36 éves. 1973-óta nem kapott ilyen fiatal tudós fizikai Nobel-díjat. A másik kissé szokatlan tény pedig az, hogy a grafénről közzölt első cikk megjelenése óta mindössze hat év telt el a díj odaítéléséig, ami kifejezetten rövid idő, bár



Grafén atomi szerkezete, ahogyan a pásztázó alagútmikroszkóppal látjuk (a felvétel az MTA MFA-ban készült).

nem egyedülálló (lásd: pásztázó alagút mikroszkóp 1981–1986, vagy magas hőmérsékletű szupravezetők 1986–1987). Maguk a díjazottak is úgy fogalmaztak, hogy nem számítottak ilyen hamar erre a magas tudományos elismerésre. Azonban a fentebb ismertetett eredmények tükrében, és figyelembe véve, hogy a grafén újszerű tulajdonságainak feltárásában és értelmezésében végig komoly szerepe volt a most díjazott két tudós, biztosan állítható, hogy a díj mögött kiemelkedő szellemi teljesítmény áll. A korai odaítélésből adódóan azt még nem lehet teljes biztonsággal eldönteni, hogy ezek az eredmények – a Nobel-díj szellemében – milyen mértékben tudnak majd hasznosulni az egész emberiség javára. Erre a nyitott kérdésre azonban úgy is tekinthetünk, mint egy lehetőségre számunkra, a grafénnel foglalkozó és a kutatásba a jövőben bekapcsolódó kutatók számára.

Irodalom

1. A. K. Geim, K. S. Novoselov: The rise of graphene. *Nature Materials* 6 (2007) 183–191.
2. A. Geim: Graphene: Status and Prospects. *Science* 324 (2009) 1530–1534.

SÓLYOM JENŐ KÖSZÖNTÉSE

A magyar fizikus társadalom nevében köszöntjük *Sólyom Jenőt*, a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagját, az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutató Intézetének kutatóprofesszorát és az ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék egyetemi tanárát hetvenedik születésnapján. Akik ismerik Sólyom professzor töretlen aktivitását, azok egy tartalmas és eredményekben gazdag életpálya szép állomásaként értékelhetik ezt a kerek évfordulót.

Sólyom Jenő az ELTE TTK fizikus szakán tanult, vele egyidőben olyan hallgatók voltak ott, mint *Kuti Gyula*, a San-Diego-i Kalifornia Egyetem professzora és *Szatmáry Zoltán*, a KFKI főigazgatója. 1964-ben kitüntetéses oklevéllel végzett, majd *Pál Lénárd* hívására a KFKI Szilárdtestfizikai Laboratóriumában kezdett el dolgozni. Ehhez a munkahelyhez, illetőleg jogutódjaihoz azóta is hűséges maradt.

Munkássága első időszakában a KFKI-ban folyó neutroindiffrakciós vizsgálatokhoz kapcsolódva különböző mágneses szerkezetek szimmetriáival és a szimmetriasértő fázisátalakulások jellemzőivel foglalkozott. Ezen vizsgálatok eredményeiből írta kandidátusi disszertációját, amelyet 1970-ben védett meg, és amely munka alapján az ELTE-n sub auspiciis doktorrá avatták.

A Kondo-probléma megjelenése után *Zawadowski Alfréddal* együttműködve bekapcsolódott a mágneses szennyezések viselkedésének tanulmányozásába. A fenti témakörben kifejlesztett renormálási csoport eljárást más aktuális szilárdtestfizikai problémák vizsgálatára is sikerrel alkalmazta. Így megemlíthetjük az időközben felfedezett szerves vezetők és szupravezetők tulajdonságainak értelmezését, a röntgenabszorpciós él alakjának vizsgálatát, valamint az egydimenziós elekt-